



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

MECHANICKÉ VLASTNOSTI SKLENĚNÝCH VLÁKEN

MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS FIBERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marija Vladimirovna Ševnina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1082/2016
Ústav: Ústav chemie materiálů
Studentka: **Marija Vladimirovna Ševnina**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Vedoucí práce: **prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Název bakalářské práce:

Mechanické vlastnosti skleněných vláken

Zadání bakalářské práce:

- Literární rešerše z vláken vyztužených polymerních kompozitů, skleněných vláken jako formy výztuže a tahového testu.
- Příprava vzorků pro tahový test jednotlivých skleněných vláken.
- Tahový test vláken a jeho vyhodnocení.
- Posouzení vztahu mezi mechanickými vlastnostmi vláken a jejich povrchovou úpravou.

Termín odevzdání bakalářské práce: 19.5.2017

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Marija Vladimirovna Ševnina
student(ka)

prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D.
vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2017

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá zkoumáním mechanických vlastností skleněných vláken bez povrchové úpravy a s komerční povrchovou úpravou. Hlavním cílem je stanovit pevnost v tahu, modul pružnosti a tažnost pro vlákna v závislosti na povrchové úpravě. Pro stanovení těchto vlastností byly změřeny průměry vláken pomocí optického mikroskopu Olympus BX 50 s následnou tahovou zkouškou na zařízení ZWICK/Z010/TH2A.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with examination of mechanical properties of unsized glass fibers and commercially sized glass fibers. The main objective is to determine the tensile strength, modulus of elasticity, and ductility for the fibers depending on the surface modification. To determine these properties, fiber diameters were measured using an Olympus BX 50 optical microscope followed by a tensile test on the Universal Testing Machine, ZWICK / Z010 / TH2A.

KLIČOVÁ SLOVA

Skleněná vlákna, tahová zkouška, pevnost v tahu, modul pružnosti, tažnost.

KEY WORDS

Glass fibers, tensile test, tensile strength, modulus of elasticity, ductility.

ŠEVNINA, M. V. *Mechanické vlastnosti skleněných vláken*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017. 30 s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce prof. RNDr. Vladimíru Čechovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, za pomoc a rady při zpracování této práce a pomoci při hledání odborné literatury a gramatické kontroly psaní textu. Děkuji také Ing. Radce Bálkové, Ph. D za spolupráci a zaučení při měření na optickém mikroskopu a tahové zkoušce. Práce vznikla za podpory výzkumného projektu 16-09161S (GAČR).

OBSAH

OBSAH	5
1. ÚVOD	6
2. TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1 Vláknové výztuže v polymerních kompozitech	7
2.2 Složení a vlastnosti skleněných vláken	8
2.3 Výroba a povrchová úprava skleněných vláken	10
2.4 Stanovení mechanických vlastností vláken	15
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	18
3.1 Popis vzorků pro analýzu	18
3.1.1 Použité materiály pro přípravu vzorku	18
3.1.2 Lepidlo.....	18
3.1.3 Přípravavzorku	18
3.1.4 Měření průměrů vláken	19
3.2 Tahová zkouška	20
4. VÝSLEDKY A DISKUZE.....	22
5. ZÁVĚR.....	28
6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	29
7. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	30

1. ÚVOD

Skleněná vlákna mají dlouhou jemnou formu s průměry přibližně 10 μm a s délkou v rozsahu od několika milimetrů až do „nekonečna“. Jsou pozoruhodnou formou hmoty a často mají vlastnosti daleko lepší než ty, které mají stejné materiály, ale o velkém objemu. Její jemnost poskytuje velkou ohebnost a spolu s nízkou hustotou byly určeny pro použití v textilním oděvu, což je její prvním tradičním umělým použitím [1]. Historie skleněných vláken se datuje zpět alespoň na několik století před naším letopočtem. V Egyptu hrubé vlákno se vytahovalo z roztaveného skla a zpracovalo se do formy nádoby vinutím na vřeteno a dalším splynutím. Společnost *Owens-Illinois* uskutečnila rozvoj činností jak ve směru izolačních skleněných vláken, tak i ve směru výztuže v 30. letech minulého století. Sloučením s *Corning Glass Works* vznikla samostatná společnost *Owens-Corning Fiberglass* v roce 1938, a to dalo impulz k velmi rychlému rozvoji vláknových kompozitů. V roce 1997 celosvětový trh vláknových kompozitů na bázi skleněných vláken činil přibližně 1,5 miliardy kg, což je více než pro všechny ostatní typy výztuže vyztužených kompozitů dohromady [2].

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Vláknové výztuže v polymerních kompozitech

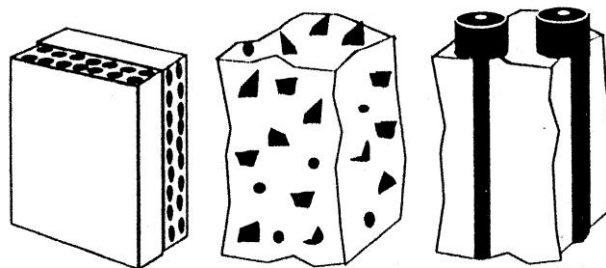
Kompozity tvoří velmi širokou a důležitou třídu inženýrských materiálů. Celosvětová výroba je více než 10 milionů tun a v posledních letech prodej vyrostl na 5-10% ročně. Kompozity nacházejí uplatnění v různých aplikacích. Navíc existuje značný prostor pro přizpůsobení jejich struktury v souladu s provozními podmínkami. Táto koncepce je moc dobře ilustrovaná pomocí biologických materiálů jako vlna, kost, zuby a kůže. Jsou to kompozity s komplexní vnitřní strukturou navrhnutou tak, aby poskytla mechanické vlastnosti, které dobře vyhovují požadavkům na výkon. Adaptace struktury vyrobených kompozitu pro různé inženýrské účely vyžaduje vklad z několika různých vědních oborů [3].

Hodně materiálů má charakter kompozitů. To platí zejména pro přírodní biologické materiály, které jsou tvořené alespoň dvěma složkami. V mnoha případech tuhá a tvrdá složka je přítomná, velmi často v prodloužené formě, a vložená do měkčí složky tvořící matrici. Na příklad, dřevo je tvořeno vláknitými řetězci molekul celulózy v matrice ligninu, zatímco kosti a zuby jsou v podstatě složeny tvrdými anorganickými krystaly (hydroxyapatit nebo osteony) v matrice organické složky tzv. kolagenu. Běžně takové kompozitní materiály se vyznačují anizotropií, jejich vlastnosti se výrazně liší, když jsou změřeny v různých směrech. Obvykle se to vyskytuje z toho důvodu, že vytvrzená složka je ve formě vlákna, přičemž osy vláken jsou vyrovnány v určitém směru. Kromě toho jedna nebo více složek mohou projevit vlastní anizotropii v důsledku jejich krystalové struktury. V přírodních materiálech anizotropie mechanických vlastností je velmi často využita uvnitř struktury. Na příklad, dřevo je pevnější ve směru vláknových tracheid, které obvykle leží vodorovně ve směru osy kmenu nebo větve, než kolmo. Velká síla je potřebná na přetržení těchto vláken ve směru jejich dloužení, vzhledem k tomu, že větev je zatížena jako konzolový nosník její vlastní hmotností a kmen je pod tlakem podobným způsobem jako pod nápurem větru. Takové zatížení kmenu vyvolává velké napětí podél délky, ale ne přes tloušťku [3].

Při výrobě umělých kompozitních materiálů, ten potenciál pro řízené anizotropie nabízí značný prostor pro integrace mezi procesy specifikace materiálů a konstrukce jejich komponentů. To je důležitý bod, protože obvykle inženýr projektuje součást a bere vlastnosti materiálů jako izotropní, tak že je to odklon od tradiční inženýrské praxe. V kompozitních materiálech velké anizotropie tuhosti a síly je možné a nutné vzít v úvahu při projektování. Materiál musí být vyroben s ohledem na to, jak on bude použit a zatížen. Tudiž proces výroby materiálů a výroby složky musí být spojený do jedné operace [3].

Existuje několik různých typů kompozitů. Příklady typických mikrostruktur pro tři hlavní třídy, seskupených podle povahy matrice jsou uvedené na **Obř. 1**. Většina kompozitů v průmyslovém použití je založená na polymerních maticích, reaktoplastech a termoplastech. Jsou to materiály obvykle zesíleny vyrovnanými keramickými vlákny, skleněnými nebo uhlíkovými, a vykazují značnou anizotropii, protože matrice je mnohem slabší a méně pevná, než vlákna [3].

Při zvažování složení kompozitního materiálů pro určitý účel použití je důležité uvažovat vlastnosti vystavené potenciálními složkami. Zvláštní zájem vyvolávají tuhost (modul pružnosti), pevnost, tvrdost. Hustota má velký význam, protože hmotnost složek hraje velkou roli. Teplotní vlastnosti jako teplotní roztažnost a vodivost musí být také vzaty v úvahu. Teplotní roztažnost složek vede k vnitřnímu zbytkovému napětí a to má vliv na mechanické chování [3].



Obr. 1: Schematické zobrazení polymeru. Sleva doprava: laminované epoxidové křížené vrstvy vyztužené uhlíkovými vlákny, hliník vyztužený karbidem křemíku, sklo keramika vyztužená jednotlivými vlákny z karbidu křemíku[3].

Uhlíková, skleněná a aramidová vlákna jsou nyní značně využívány v polymerních matricích. Keramická vlákna, stuha a částice mohou být použité pro zesílení kovu a keramických matricí. V nepřítomnosti vzduchu nebo v jiných oxidačních prostředích, uhlíková vlákna mají výjimečně dobré vlastnosti při vysokých teplotách. Vlákna udržují své vynikající vlastnosti nad 2000 °C. Pro využití polymerní matrice tato vlastnost není vhodná, protože matrice nemůže být použita při teplotách vyšších než 200 °C [3].

2.2 Složení a vlastnosti skleněných vláken

Složení komerčně vyrobeného skla se vyvíjelo pro optimalizaci větší části specifických vlastností vláken pro konkrétní trh. Například, deska plošných spojů vyžaduje vlákna s nižší elektrickou vodivostí, a vápenato-hlinité borokřemičitany s maximálně 2% obsahem zásad. Těmto vláknům bylo uděleno označení „E-sklo“, které vyznačuje elektrickou třídu. Tradice asociace specifického literárního označení se vyvíjela spolu se skelným chemickým složením a sděluje sadu unikátních inženýrských vlastností [2].

A-sklo je sodné křemičité sklo, které se levněji vyrábí (z důvodu nižších teplot procesu výroby a nulového obsahu boru), než E-sklo, ale má horší elektrické vlastnosti. D-sklo má borokřemičité složení, které je vyvíjeno pro nízkou dielektrickou konstantu v určitých vysoce výkonných elektrických aplikacích. ECR-sklo je vápenato-hlinité křemičitan s 2% maximálním obsahem zásad a s podobnými vlastnostmi jako E-sklo, jenže je víc odolný vůči korozi v kyselém prostředí. AR-sklo má alkalické zirkono-křemičité složení, které poskytuje potřebnou odolnost vůči alkáliím v cementu a taky zesílení betonů. S-sklo je hořečnato-hlinité křemičité sklo, které dodává nejvyšší kombinaci mechanických, termických a chemických vlastností ze všech komerčně přístupných skleněných vláken. Je především použito v kosmickém prostoru a vojenských aplikacích. Procentuální rozsah každého použitého oxidu v různých literárních označeních jsou uvedené v **Tab. 1** [2].

Složení se liší podle jednotlivých typů skla. Ten rozsah je dostatečně velký a různé vlastnosti jsou zahrnuté v sérii. Tudiž je nutné specifikovat složení skla ne jen pomocí označení jednotlivými písmeny [2].

Písmena uvedená v **Tab. 2** jsou použita pro označení průměrů komerčních vláken. Je pozoruhodné, že při komerční výrobě rozsah průměrů není změřen rutinně. Místo toho střední průměr (písmenné označení) je stanoven měřením v yardecích (yd lb^{-1}), což je převrácená hodnota hmotnosti na jednotku délky svazku vláken ($\text{v g}\cdot\text{km}^{-1}$ [„Tex“] neboli g/9000 m [„Denier“]). Statistické rozložení průměrů v komerčních výrobcích je obvykle v rozmezí $\pm 10\%$ střední hodnoty použité pro výběr písmenného označení [2].

Filamenty, které jsou vyrobené v zkroucené konfiguraci a obsahují průměry vláken od B, do G až H (převážně D a G) jsou nazvané příze. Tyto vlákna jsou dost tenká, aby umožnily vysokorychlostní otočení a pletení do textilní tkaniny. Příze je obecně pokrytá škrob-olejovým základem, který je speciálně zkoncipován umožnit operaci po pletení a především vypálit tkaninu docela dobře a naprosto. Tkadlec pak dodělá tkaninu pomocí konečné úpravy (tzv. „finish“), jejíž chemie je přizpůsobená vlastnostem specifického konečného výrobku (deska plošných spojů, filtrační sáčky, zesílený papír) [2].

Tab. 1: Rozsah složení pro oxidy použité ve specifických komerčních skleněných vláknech [2].

Oxid	A-sklo (%)	C-sklo (%)	D-sklo (%)	E-sklo (%)	ECR-sklo (%)	AR-sklo (%)	R-sklo (%)	S-2-sklo (%)	Bez boru E-sklo (%)
SiO ₂	63–72	64–68	72–75	52–56	54–62	55–75	55–65	64–66	52–62
Al ₂ O ₃	0–6	3–5	0–1	12–16	9–15	0–5	15–30	24–25	12–16
B ₂ O ₃	0–6	4–6	21–24	5–10		0–8			
CaO	6–10	11–15	0–1	16–25	17–25	1–10	9–25	0–0,1	16–25
MgO	0–4	2–4		0–5	0–4		3–8	9,5–10	0–5
ZnO					2–5				
BaO		0–1							
Li ₂ O						0–1,5			
Na ₂ O+K ₂ O	14–16	7–10	0–4	0–2	0–2	11–21	0–1	0–0,2	0–2
TiO ₂	0–0,6			0–1,5	0–4	0–12			0–1,5
ZrO ₂						1–18			
Fe ₂ O ₃	0–0,5	0–0,8	0–0,3	0–0,8	0–0,8	0–5		0–0,1	0–0,8
F ₂	0–0,4			0–1		0–5	0–0,3		0–1,0

Vlákna s průměrem větší než G jsou nazvané *výztuž*. Jsou používány v sekané nebo nepřetržité formě ve všech tradičních procesech výroby termoplastů a reaktoplastů [2].

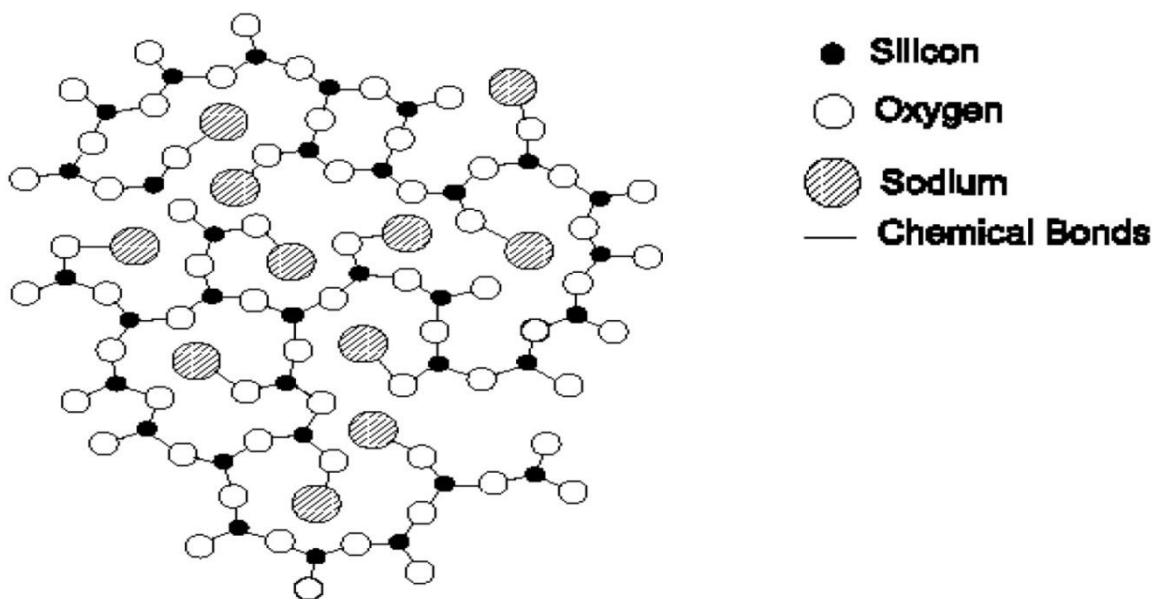
V dnešní době více než 95 % polymerních kompozitů vyztuženo komerčním skleněným vláknem typu E. Avšak, z ekologických předpisů je nezbytné snížení emise v Evropě a v Severní Americe pro výrobce skleněných vláken především kvůli výbušným boritanovým a fluorovým složkám. V roce 1997 Owens-Corning představili nové složení skla bez fluoru a boru na trhu zesílených vláken [2].

Složení většiny skleněných vláken je založené na křemenu s doplněním oxidů vápníků, bóru, sodíků, železa a hliníků. Tato skla jsou obvyklé amorfni, ačkoli nějaká krystalizace může vzniknout po dlouhodobém procesu ohřevu za vysoké teploty, vedoucí k redukci pevnosti. Pevnost a moduly pružnosti vlákna jsou dány především molekulovou strukturou. Skla na bázi oxidu křemičitého se skládají z kovalentních vazeb čtyřstěnu. Atomy kyslíku jsou rozděleny mezi čtyřstěnem, což vede k tuhé trojrozměrné síti. Přítomnost prvků s nižší valencí (Ca, Na a K) má tendenci rozbit tuto síť vytvářením iontových vazeb s atomem kyslíku. Přídavek těchto elementů vede k snížení tuhosti a pevnosti, ale zlepšuje tvárnost [3].

Tab. 2: Písemné označení a střední průměr vláken pro komerčně dostupné skleněná vlákna [2].

Příze			Zesílení					
Litera	Průměr		Litera	Průměr		Litera	Průměr	
	m ⁻⁶	in ⁻⁵		m ⁻⁶	in ⁻⁵		m ⁻⁶	in ⁻⁵
B	3.2	12.5	GH	10.0	36.9	P	18.4	72.5
C	4.4	17.5	H	10.8	40.0	Q	19.7	77.5
D	5.7	22.5	J	12.1	47.5	R	21.0	82.5
DE	6.5	25	K	13.3	52.5	S	22.2	87.5
E	7.0	27.5	L	14.6	57.5	T	32.5	92.5
F	8.2	32.5	M	15.9	62.5	U	24.8	97.5
G	9.3	37.5	N	17.2	67.5			

Kromě oxidu křemíku, oxid boritý je jiné síťovadlo s mnohostěnnou strukturou, které se spojí s křemičitou sítí. Oxid hlinitý, titaničitý a zirkoničitý poskytují kationty, které mohou nahradit křemík v síti, přispívají síti stabilitou a mají název *intermediáty*. Všechny ostatní oxidy uvedené v Tab. 1 mají název „modifikátory“ protože mohou tvořit jenom jednu nebo dvě chemické vazby tudíž narušují strukturu. Dvourozměrné zobrazení zjednodušené skleněné struktury na Obr. 2 ukazuje amorfni křemičitou složku jako propojenou síť křemičitého a kyslíkového atomu. Síťové modifikátory jsou esenciální pro snížení teploty tání skla, ovlivňují viskózně-teplotní vztah [2].



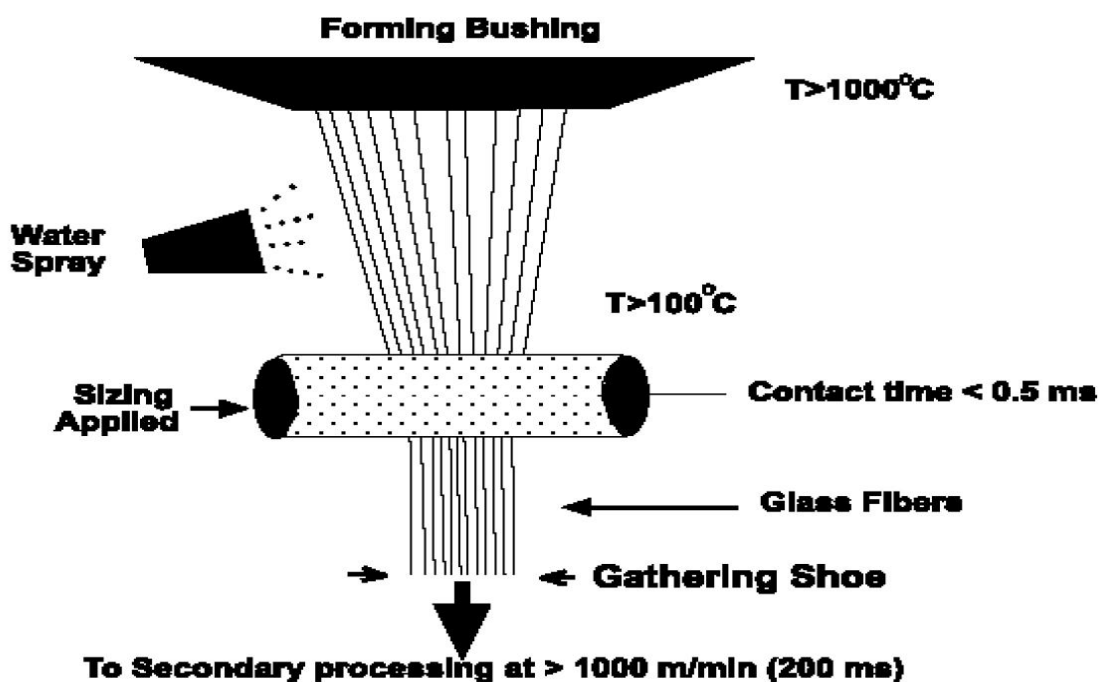
Obr. 2: Idealizovaný model amorfni atomové struktury typického skla [2].

2.3 Výroba a povrchová úprava skleněných vláken

Skleněná vlákna se vyrábí tavením vhodných surových materiálů v pecích a následným přívodem do platinových průchodek, kde každá má několik set otvorů ve svém základě. Sklo teče pod vlivem gravitačních sil a tenká vlákna jsou vytáhnutá mechanicky dolů v okamžik, kdy sklo extruduje z otvoru [2].

Sklářský písek je zdrojem křemene. Kaolinit s nízkým obsahem alkálii je pramenem hliníku. Zdroj oxidu hořečnatého je představen buď dolomitem, ekvimolárním uhličitánem hořečnatým/uhličitánem vápenatým, anebo spáleným dolomitem. Oxid vápenatý poskytuje vápenec. Oxid boritý představí kolemanit (boritan vápenatý) nebo kyselina boritá [2].

Pece v průmyslu skleněných vláken jsou postaveny z cihly obsahující několik typu žáruvzdorných materiálů a jsou složeny ze tří úseků: tavení, rafinace a chlazení. Konečná teplota vytažení taveného skla je kontrolována velmi pečlivě elektrickým ohříváním desky ze slitiny platiny a rhodia. Roztavené sklo teče normálně pod silou gravitace přes 1–2 mm cylindrický hrot jak je znázorněno na Obr. 3. Průchodka obsahuje 10 000 hrotů. Otáčející se buben nebo „take-up“ kotouč se nachází o jedno patro níže pod průchodkou a táhne vlákna velmi vysokou rychlostí (450–4500 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$). Jednotlivá vlákna jsou ochlazena rychlostí 10^4 – 10^5 $^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$. Průměr vláken se sníží o faktor 100–300 ve srovnání s průměrem průchodkového hrotu. Do značné míry dynamika tekutiny ovlivňuje složení zvláknovaného skla, jakož i optimální výrobní podmínky (teplotu průchodky, rychlost navíjení, hloubka roztaveného skla nad průchodkou). Proces vytahování taky vytváří termochemickou historii, která ovlivňuje vlastnosti vlákna jak hustotu, index lomu, modul pružnosti a chemickou stálost [2].

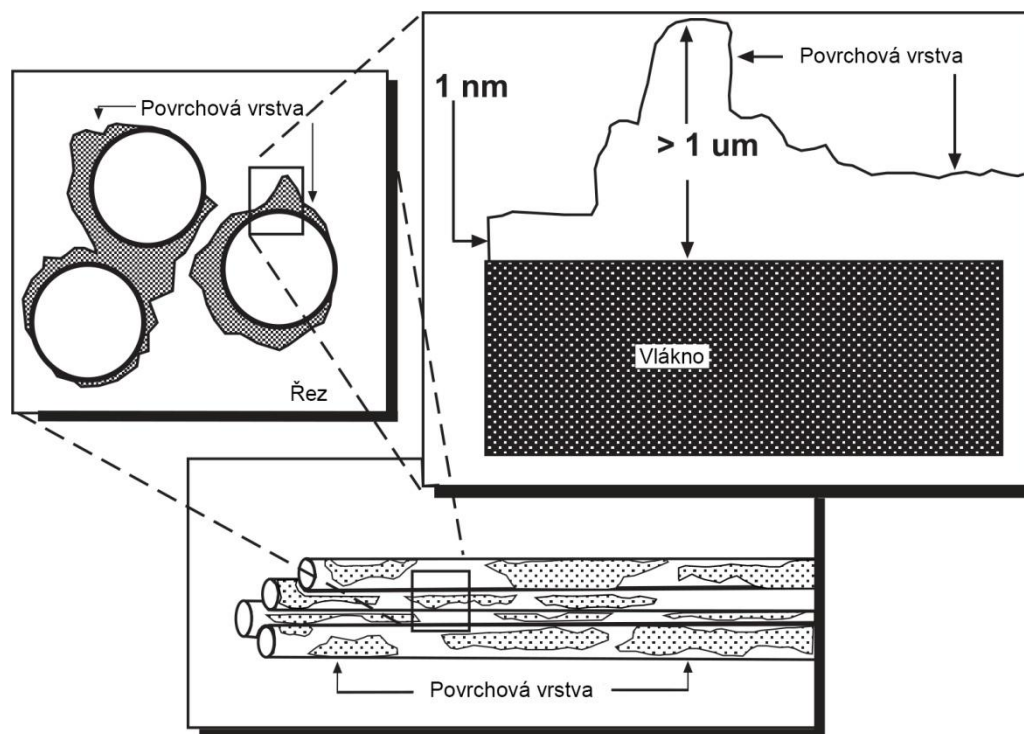


Obr. 3: Zjednodušené schéma výroby skleněného vlákna [2].

Po vytvoření vláken a před sružením vláken dohromady, je povlak (apretura, lubrikace) aplikován aspoň na část povrchu jednotlivých vláken s cílem povrchové ochrany a napomáhání při zpracování. Kromě toho, povlaky mohou hrát dvojí roli. Nejen ochranu, ale i zajistit kompatibilitu mezi vláknem a matricí polymeru nebo pryskyřice. Povrchově upravená skleněná vlákna mohou být použita v širokém výběru aplikací například v obrazovkách, páscích, podlažích, leteckých kompozitních materiálech, v tkanině pro námořní aplikace, roletách, pletených výrobcích, mulových tkaninách, filtrech a atd. [4].

Během milisekund tuhnutí skleněná vlákna procházejí napříč válcem aplikátoru, kde jsou potažené povlakovým roztokem Obr. 4. Ten povlak činí 0,2–2 % hmotnosti vlákna. Aplikátor je složen z grafitového válce, částečně ponořeného a rotujícího v povlakovém roztoku, který obvykle neustále obíhá přes aplikovanou pánev. Vlákna se pohybují rychle přes tenkou povlakovou vrstvu na povrchu grafitového válce. Proces zarovnání vláken od tvarovacích průchodek do místa spojení určuje délku středního styku vlákna s válcem aplikátoru. Množství posbíraného povlaku je úměrné koncentraci tuhé látky v dispersi v nádrži, a to je obvykle v rozsahu 3–10 hm. %. Během sružování

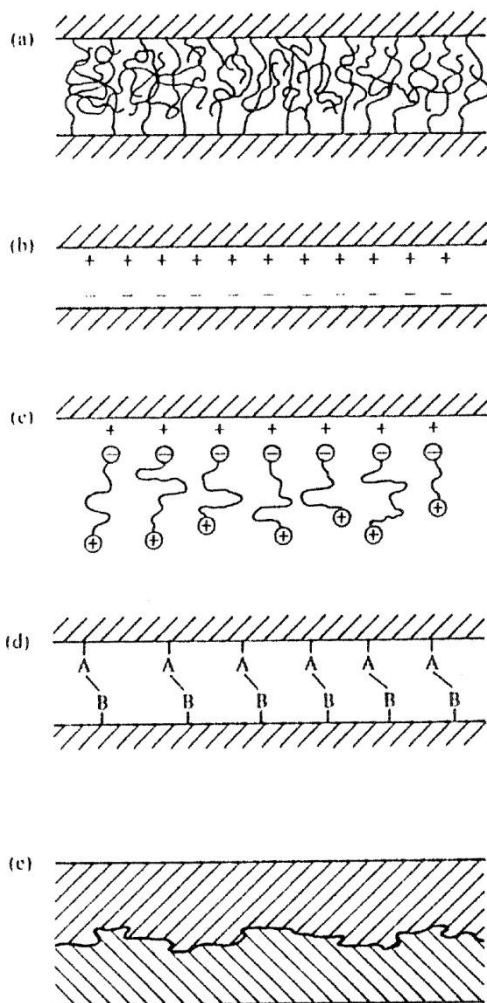
vláken, 20–50 % povlaku je odstraněno z povrchu v místech kontaktu. Tloušťka a jednotnost výsledných povrchových úprav na vláknech závisí především na povaze filmotvorné látky (majoritní složka), vzájemnou slučitelností a LOI (loss on ignition – ztráta při žhání). Avšak moderní povrchové analytické výzkumy ukázaly, že povlaky jsou obvykle heterogenní, s tloušťkami kolísajícími od méně než 10 nm do více než 1 μm . Na Obr.2 je vidět schematickou ilustraci povrchové úpravy a průřez individuálních vláken ze svazku [2].



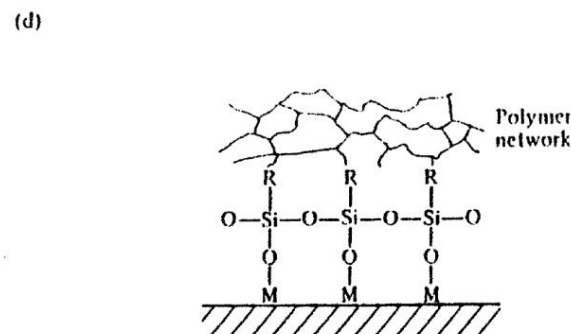
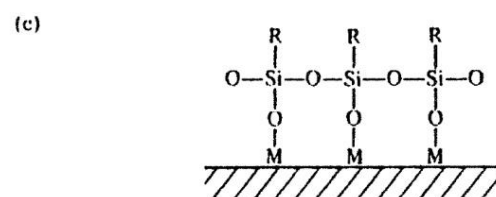
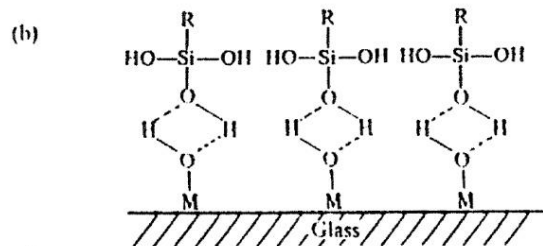
Obr. 4: Idealizované zobrazení nerovnoměrné distribuce povrchových vrstev [2].

Předpokládá se, že povlakové roztoky na skleněných vláknech poskytují a mají různé vlastnosti, jako kluzkost a celistvost, aby umožnily vysokorychlostní procesy, jakož i slučitelnost se specifickou pryskyřicí tvořící polymerní matici. Složkami povlaku jsou následující přísady: filmotvorné složky (PVAc, epoxidy, polyuretany, polyolefiny), lubrikanty (imidazoly, pentaminsteráty, uhlovodíkové vosky, polyetylen glykoly, minerální oleje/amidové estery, atd.), vazebná činidla (organokřemičitany, chromany, titany, zirkoničitany), antistatické prostředky (kvartérní amoniové složky, halogenidové soli), nukleární činidla (maleinizovaný polypropylen), povrchově aktivní látky (polyoxyetylenonnylfenylether, glykol ethers), kyseliny a báze (octová kyselina, hydroxid amonný) [1]. Funkcí filmotvorných komponent je kompatibilita s matricí, ochrana vláken, poskytování integrity vláken. Lubrikanty jsou nezbytné pro ochranu a zlepšení tvárné účinnosti. Vazebná činidla slouží k zmenšení vodní koroze pod napětím a spojení mezi sklem a pryskyřicí. V minulosti, skleněná vlákna byla pokryta olejem na bázi škrobu a uplatňovali se v PVC povlacích. Nicméně výrobky z nichž měly problémy s třením [2].

Různé typy difuzních procesů, které podporují adhezi, mohou probíhat na rozhraní. Například na Obr. 5 (a) je zobrazena difuze volných konců řetězce na rozhraní mezi dvěma polymery, která vede k spletní a zvýšení síly přilnavosti. Tento efekt je využit v některých vazebných činidlech v reaktolpastových matricích. Vnitřní difuze taky probíhá v nepolymerních systémech, zejména pokud je to doprovázeno chemickou reakcí. Síla adheze zaleží na povaze výsledných intermolekulárních vazeb a taky na stresu vyvolaném reakcí [3].



Obr. 5: Difuze volných konců řetězce na rozhraní mezi dvěma polymery (a), elektrostatická přitažlivost (b), kationová skupina na konci molekul přitažena k aniontovému povrchu, chemická reakce (d) a (e) mechanické spojení ploch [3].



Obr. 6: Silanová vazebná činidla: (a) hydrolyzá organosilanu, (b) vodíkové můstky mezi hydroxylovou skupinou silanolu a skupinami připojenými ke skleněnému povrchu, (c) polysiloxan navázaný na sklo po kondenzační reakci v průběhu sušení a (d) vazby mezi funkčními skupinami R a polymerní maticí [3].

Různé typy chemických reakcí mohou nastat na rozhraní, buď úmyslně podporovaných nebo neúmyslných. Je to představeno na **Obr. 5** (d), novými vzniklými A-B vazbami jako výsledek chemických reakcí. Tyto vazby mohou být kovalentní, iontové, kovové atd. a v mnoha případech jsou velmi silné. Existuje mnoho případů, kdy mezifázová síla vazeb byla zvýšena lokálními reakcemi [3].

Na površích, které nesou elektrický náboj opačného znaménka, jako je na **Obr. 5** (b) může dojít k trvale přilnavosti. Tento účinek se používá při určitých úpravách při usazení vazebného činidla na skleněné vlákno. Povrch může projevovat aniontové a kationové vlastnosti, to zaleží na oxidu ve skle a na PH vodného roztoku použitého při aplikaci vazebného činidla. Pokud iontové funkční silany jsou použité, očekává se, že funkční kationové skupiny budou přitáhnuty k aniontovému povrchu a obráceně jako je na **Obr. 5** (c). Elektrostatické síly pravděpodobně nepředstavují hlavní adhezivní vazby v kompozitech a jejich možné snadno zmenšit, například vybitím pomocí silně polárního rozpouštědla, jakým je například voda [3].

Příspěvkem k pevnosti styčné plochy nerovného nebo drsného vlákna s matricí je dobrá smáčivost **Obr. 5** (e). Účinky jsou mnohem významnější pod smykovým zatížením než z koheze jako výsledku pevnosti v tahu. Je možné zlepšit odpor k porušení v tahu, a to přítomností vstupujících úhlů, a zvětšení v pevnosti pod všemi typy zatížení jako výsledek zvětšení oblasti kontaktu [3].

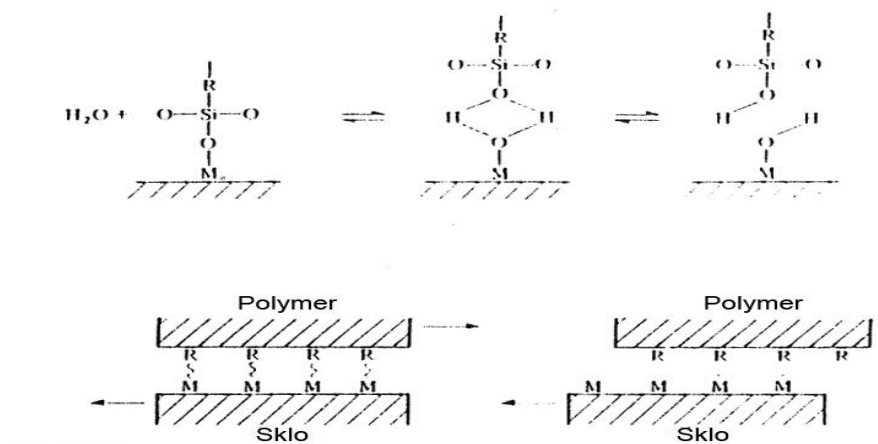
Podstata povrchového kontaktu je velmi ovlivněna přítomností zbytkového napětí. A to vzniká z řady zdrojů jako například plastická deformace matrice. Existují také změny v objemu spojené s vytvrzováním reaktoplastů. Jedním z nejdůležitějších zdrojů zbytkového napětí jsou tepelné kontrakce, které vznikají v průběhu chlazení po výrobě. Poněvadž, pro většinu kompozitů, vlákno má menší teplotní roztažnost (koeficient teplotní roztažnosti), než matrice, výsledná napětí jsou stlačitelné ve vlákne a roztažitelné v matrice. To vzniká, protože matrice stlačuje na vlákno a zatěžuje ho [3].

Hodně povrchových úprav bylo vytvořeno pro zlepšení trvanlivosti a mechanické pevnosti vlákno-matricové vazby. Dobrým příkladem jsou skleněná vlákna, která velmi často trpí problémy vyvolané s přitahováním vody. Některé oxidy ve skle, jako oxid křemičitý, oxid železitý, oxid hlinitý, vytvářejí vazby na hydroxylovou skupinu během kontaktů a molekula vody vytváří vodíkovou vazbu, takže sklo sbírá vodu velmi rychle. S časem, to může vyluhovat ostatní elementy ve skle, zejména sodík a draslík a nechat slabý, porézní povrch. Přítomnost vody taky snižuje smáčivost vláken, zvětšuje povrchovou energii s $500 \text{ m} \cdot \text{Jm}^{-2}$ na $10\text{-}20 \text{ m} \cdot \text{Jm}^{-2}$. Obecně interfaciální smyková pevnost je snižována, pokud polymer je vystaven ovlivnění vody, ačkoli s některými termoplastickými matricemi byl zaznamenán nárůst [3].

Povlak, který funguje jako vazebné činidlo, je navrhnutý pro vyloučení efektu loužení a zvýšení hodnoty efektivnosti povrchové energie alespoň na $40\text{-}50 \text{ m} \cdot \text{Jm}^{-2}$. Hlavní funkcí vazebného činidla je poskytování pevné chemické vazby mezi oxidovými skupinami na povrchu vlákna a polymerními molekulami pryskyřici. Široká škála komerčních vazebných činidel byla vytvořena, ale základní principy jsou uvedené na **Obr. 6** (a). Toto se týká silanových vazebných činidel, které mají obecný chemický vzorec R-Si-X_3 . To je multifunkční molekula, která reaguje jedním koncem s povrchem skla a druhým koncem s polymerní fází. Jednotky X představují hydrolyzovatelné skupiny jako například ethoxydová skupina ($-\text{OC}_2\text{H}_5$). Silan je hydrolyzovaný na odpovídající silanol ve vodném roztoku, kterému vlákna jsou vystaveny. Tyto silanolové molekuly soutěží s vodnými molekulami aby vytvořily vodíkové můstky s hydroxylovou skupinou s povrchem vlákna **Obr. 6** (b). Kdy vlákna jsou vysušena, volná voda odchází a kondenzační reakce probíhají jak ve spojení silanol/vlákno tak i mezi sousedními molekulami silanolu **Obr. 6** (c). Výsledkem je polysiloxanová vrstva spojená s povrchem skla, která představuje řadu R skupin do prostředí [3].

Ten povlak je hydrofobní a taky může vytvářet pevné vazby k polymerní matrici. Pokud matrice je tvořena reaktoplastem, pak je vybrána R skupina, která reaguje s pryskyřicí v průběhu polymerizace a tím vytváří permanentní vazbu. Pro termoplastickou matrici, na rozdíl od toho, všichni kovalentní vazby byly vytvořeny v průběhu výroby polymeru. Avšak zvolení R s poměrně krátkým řetězcem může vyvolat vnitřní difuzi s řetězcí matrice a povolit pevnou vazbu s nimi. Efektivnost vazebných činidel v polymerních výztužích a jejich efekt na povahu kompozitu je zřejmý v lomových plochách pod SEM mikroskopem. Taky je očividně, že činidlo poskytuje pevnou vazbu, přilnavost vrstvy plastu k vláknům a značnou deformaci matrice [3].

Další bod, který je třeba poznamenat o funkci vazebných činidel – jejich reversibilita tvorby vazeb. Plueddemann (1974) navrhnul, že pohyb v rozhraní může uvolnit místní stress jak je na **Obr. 7**. V přítomnosti malého množství vody povrchy mohou klouzat bez porušení stálých vazeb. Přímé důkazy vratnosti vazeb byly obdrženy FTIR (Ishida and Koenig 1980) [3].



Obr. 7: Mechanismy vytváření oboustranných vazeb spojených s hydrolyzou jak navrhnul Plueddemann(1974). Smykové posunutí bez trvalého poškození mezipovrchových vazeb[3].

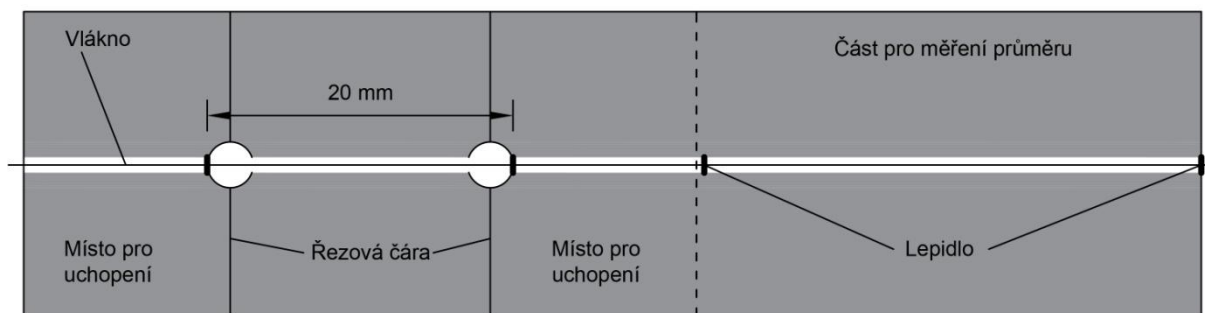
2.4 Stanovení mechanických vlastností vláken

Výroba velkých konstrukcí jako rotorová lopatka větrné turbíny, která dosahuje 45 m, nebo trup lodí vyžadují výbornou pevnost, aby se vyhnout zlomů a prasklin materiálů kvůli jejím vlastním hmotnostem. Kompozity vyztužené skleněnými vlákny jsou určeny pro tyto účely. Skleněné vlákno je jedním z vysoce výkonných vláken a nejčastěji vybraným z důvodu nižší ceny ve srovnání s uhlíkovým vláknem. Avšak pevnost kompozitu ve směru vláken je přímo ovlivněna pevností vlákna, které vykazuje velký rozptyl. Pevnost vlákna je možné popsat teorií nejslabší vazby, která předpokládá, že daný objem materiálu se poruší na nejslabším místě. Se snížením objemu materiálů se snižuje pravděpodobnost kritických vad. Výsledkem je, že takový materiál je dobře popsán statistickou distribucí známou jako Weibullovo rozdělení [5].

Tradičně skleněná vlákna jsou povrchově upravená. Tato úprava je na bázi vodné formule vazebného činidla, filmotvorných látek a jiných komponentů. Vazebné činidlo je obvykle molekula na bázi silanu s aktivními konci spojenými se sklem a s matricí. Velmi důležité je uvažovat vliv povrchové úpravy na pevnost v tahu. Zatímco povrchová úprava splní cíl zlepšení mezifázové adheze mezi vlákny a pryskyřicí, ona taky ochraňuje vlákna v průběhu procesu abraze a od působení životního prostředí. Použití úpravy může zahojit povrchové vady zaplněním jejich trojrozměrnou sítí silanovým vazebným činidlem, které vytváří kovalentní vazby se sklem a tím v podstatě snižuje hloubku povrchových vad [5].

Pevnost v tahu komerčních skleněných vláken je určovaná tahovou zkouškou jednotlivého vlákna. Křehká vlákna mají výrazný rozptyl namáhání z důvodů vad v nich přítomných [7], [8]. Vlákna jsou analyzovaná po přijetí od výrobce. Weibullovo rozdělení dvou sérií je použité pro srovnání pevnosti povrchově upravených a neupravených vláken. A to ukazuje, že velké množství testů je potřeba aby to vedlo k spolehlivému dvouparametrovému Weibullovému rozdělení. Experimentální testy jasně ukazují na to, že povrchově neupravená vlákna jsou slabší v rozsahu nižší síly, ale mají stejnou pevnost v rozsahu vyšší síly. Výzkum povrchu místa zlomu pomocí SEM jasně představil obraz rozdílů v zlomech vláken s vysokou a nízkou pevností [5].

Šablony jako na Obr. 8 s prohlubní na fixovanou vzdáleností 20 mm. Jednotlivá vlákna jsou uchycené lepidlem na obou koncích tak, aby udržet umístěné v svislé pozici vlákno nahoře této šablony v natáhnutém stavu. Vlákna se udržují v plastovém sáčku mezi měřeními, aby nedošlo k styku s prachem a jinými částicemi. Obr. 8 ukazuje tečkovanou čáru, místo ve kterém držící část je rozřezaná na dvě: jedná pro měření průměru vláken, druhá pro tahovou zkoušku [5].



Obr. 8: Vzorek pro měření průměru a tahovou zkoušku [5].

Průměry vzorků jsou proměřeny pomocí mikroskopu se zvětšením 500X. Každý průměr je vyfocen 10krát v různých jeho částech, abychom obdrželi aritmetický průměr a standardní odchylku. Metoda měření průměru je vybrána, aby se vyhnout poškození vzorků. V průběhu měření mikroskopem, vlákno se nachází v kontaktu s objektivem a může být ohnuto nebo poškrábáno [5].

Pevnost v tahu se počítá podle vzorce uvedeného níže:

$$\sigma_{TS} = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi d^2}, \quad (1)$$

kde F je zatížení a d je změřený průměr vlákna.

Experimentální nejistota je stanovena podle rovnice (2), pro obdržení odhadu chyby experimentu

$$\mu_{TS}^2 = \mu_F^2 + 4\mu_d^2, \quad (2)$$

kde μ_{TS} je variační koeficient pevností v tahu a je určen variačními koeficienty zatížení μ_F a diametrů μ_d . Variační koeficient μ je definovaný jako podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru:

$$\mu = \frac{s}{\bar{x}}, \text{ kde } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ a} \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

kde x_i je hodnota měření a n je počet provedených měření. Průměr obsahuje dva zdroje nejistot: za první – průměr se mění s délkou skleněného vlákna μ_{d1} , za druhé – měření se provádí vždy s různými vlákny μ_{d2} a ty dva zdroje nejsou závislé na sobě, a proto μ_d se počítá podle následující rovnice:

$$\mu_d = \sqrt{\mu_{d1}^2 + \mu_{d2}^2}. \quad (5)$$

Výsledná směrodatná odchylka $s_{TS,i}$, která může být spočítána pro každé jednotlivé měření:

$$s_{TS,i} = \mu_{TS} \sigma_{TS,i} \quad (6)$$

Statistická analýza pevnosti skleněného vlákna se běžně provádí pomocí použití dvouparametrového Weibullová rozdělení. Pravděpodobnost přežití (neporušení) je popsána rovnicí s délkou L a napětím σ :

$$P_F(\sigma, L) = 1 - \exp\left(-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right), \quad (7)$$

kde m je Weibullův modul, σ_0 je parametr měřítka, L_0 je počáteční délka vzorku. Weibullův modul charakterizuje rozptyl – jak se mění pevnost v okolí σ_0 . Po dosazení do rovnice (7) stálé hodnoty délky skleněného vlákna 20 mm, získá se rovnice (8) při $L = L_0$:

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-P_F(\sigma)}\right)\right] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (8)$$

Odhad pro výpočet pravděpodobnosti neporušení pro i -ou hodnotu pevnosti:

$$P_F(\sigma_i) = \frac{i-0.5}{N} \quad (9)$$

kde N celkový počet testovaných vláken [9], [10]. Tato rovnice pro pravděpodobnost neporušení je doporučena pokud Weibullové parametry jsou určeny lineární regresí. Z rovnice (8) je vidět, že funkce se na levé straně mění lineárně a Weibullův modul je dán sklonem. Snadněji získat m a σ_0 lineární regresí [5].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Popis vzorků pro analýzu

3.1.1 Použité materiály pro přípravu vzorku

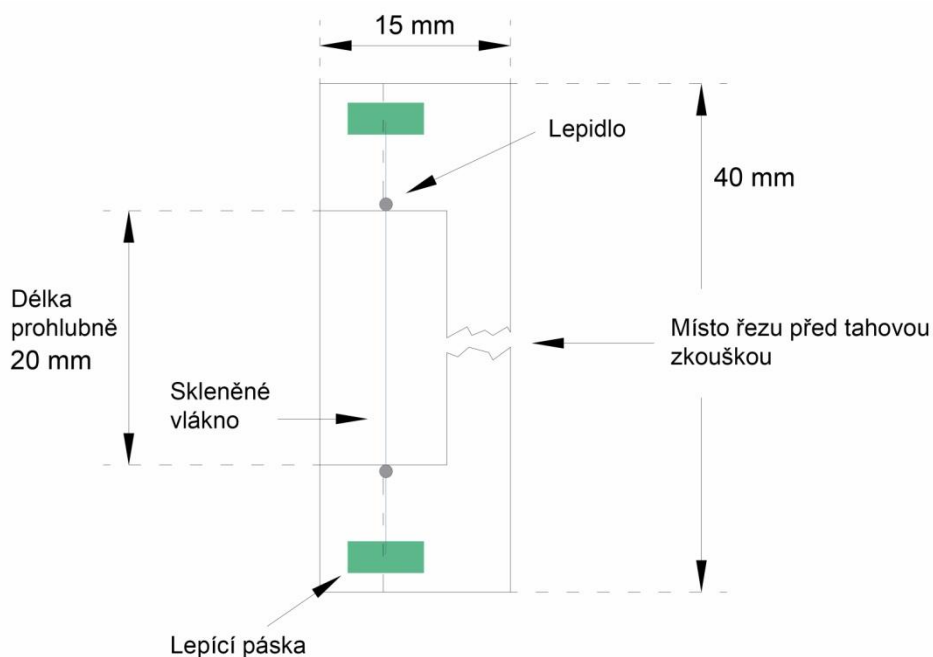
V této bakalářské práci byly použity svazky vláken E-typu nekonečných skleněných vláken bez zákrutu, které byli poskytovány společností Saint-Gobain Adfors, a.s., Litomyšl, Česká Republika. Výrobce zaručil průměry jednotlivých vláken 19 μm ve svazkách 1200 tex. Jeden typ jsou neupravená vlákna jen ochlazené destilovanou vodou a pak navinuté na papírové roli, druhý typ je komerčně povrchově upravená vlákna, ke kterým po ochlazení destilovanou vodou byla aplikována lubrikace 707, která poskytuje vysoký výkon spolu s polyesterovou pryskyřicí a pevnější systém ve všeobecném použití. Oba typy vláken se uchovávaly na fakultě při laboratorní teplotě.

3.1.2 Lepidlo

Pro přípravu vzorku byla použita dvousložková epoxidová pasta – lepidlo značky *LETOXIT PL 20*, která vytvrdí při pokojové nebo zvýšené teplotě se smykovou pevností 31–36 MPa, pevností při odlupování 4–7 N/mm při 20 °C. Spoj dosahuje vysoké pevnosti ve smyku a dobře odolnosti proti odlupování při teplotách do 80°C. Maximální pevnost se získá ohřevem při teplotě 120 °C po dobu jedné hodiny.

3.1.3 Příprava vzorku

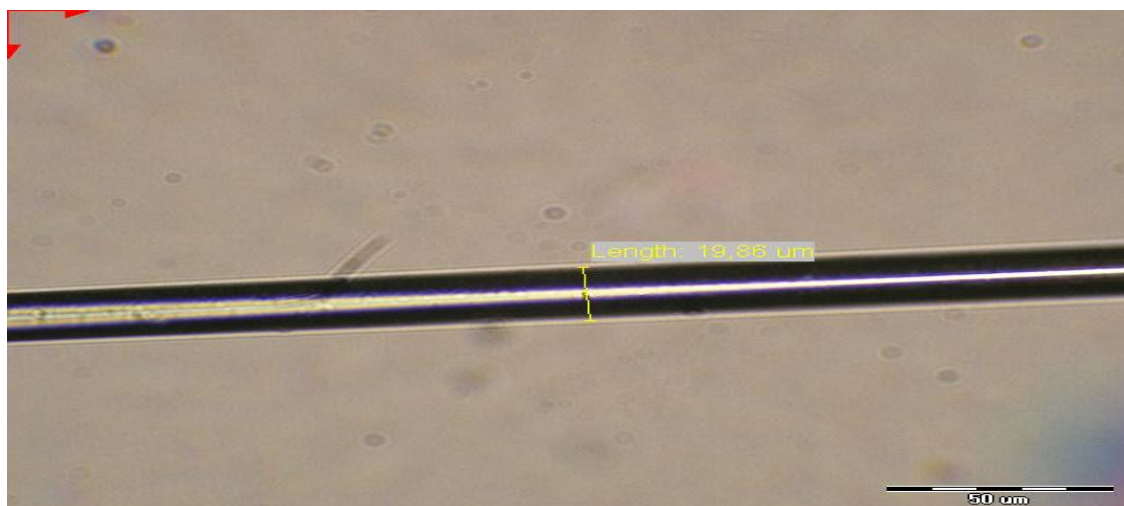
Jednotlivé vlákno použité pro tahovou zkoušku bylo opatrně vytáhnuté ze svazku. Byla připravená papírová šablona jak je na **Obr. 9** o velikosti 15x40 mm s prohloubením 10 mm. Vlákno bylo umístěno uprostřed prohloubení a s obou stran zafixováno pomocí lepicí pásky a dvou kapiček lepidla. Délka vlákna tedy byla určena prohloubením na 20 mm. Bylo připraveno více než 50 vzorků v každé sérii a provedena tahová zkouška při laboratorní teplotě (24 °C).



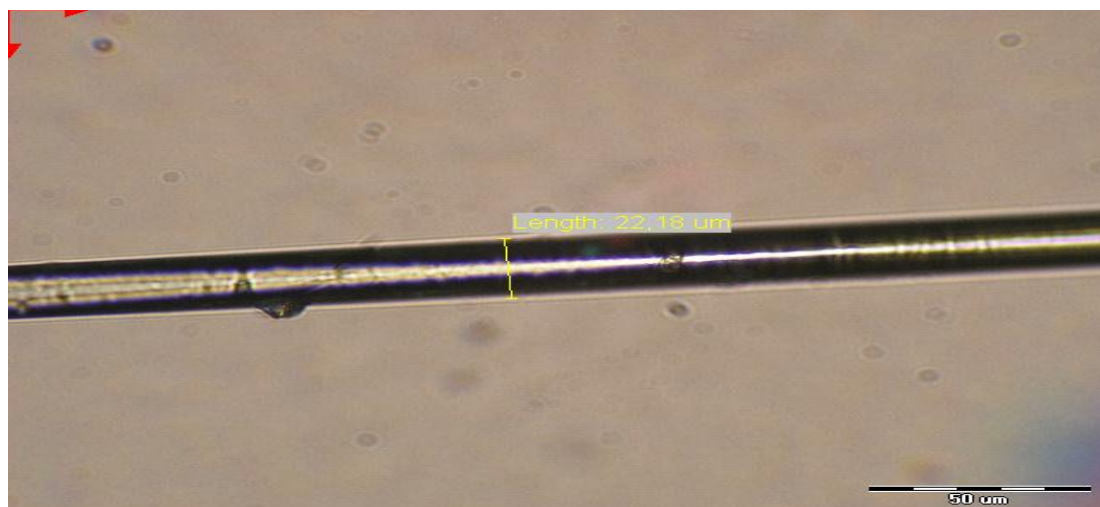
Obr. 9: Jednotlivý vzorek připravený pro měření průměru a tahovou zkoušku

3.1.4 Měření průměrů vláken

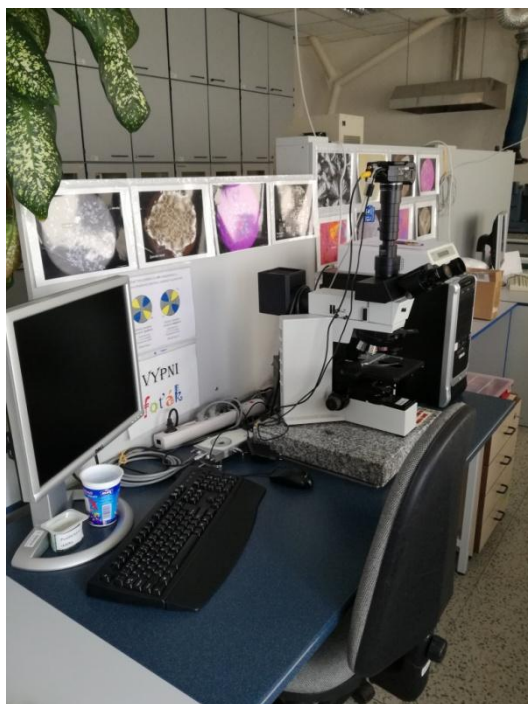
Po uschnutí kapiček lepidla (12 hodinách) byli změřeny průměry každého skleněného vlákna. Měření se provádělo pomocí polarizačního optického mikroskopu Olympus BX50 12spojeným s digitálním fotoaparátem C4040-ZOOM s programem pro optickou analýzu (Soft Imaging Systém, analySIS). Zvětšení bylo vybráno 500×. Jednotlivý vzorek – šablona byl položen na podložní sklíčko, a sklíčko uchyceno pomocí držáku. Obraz byl zaostřen a vyfocen. Diametr jednotlivého vlákna byl změřen tři krát v různých částech a s toho byl vypočítán průměr.



Obr. 10: Obrázek neupraveného skleněného vlákna získány v průběhu měření na optickém mikroskopu



Obr. 11: Obrázek upraveného skleněného vlákna získány v průběhu měření na optickém mikroskopu



Obr. 12: Optický polarizační mikroskop Olympus BX50

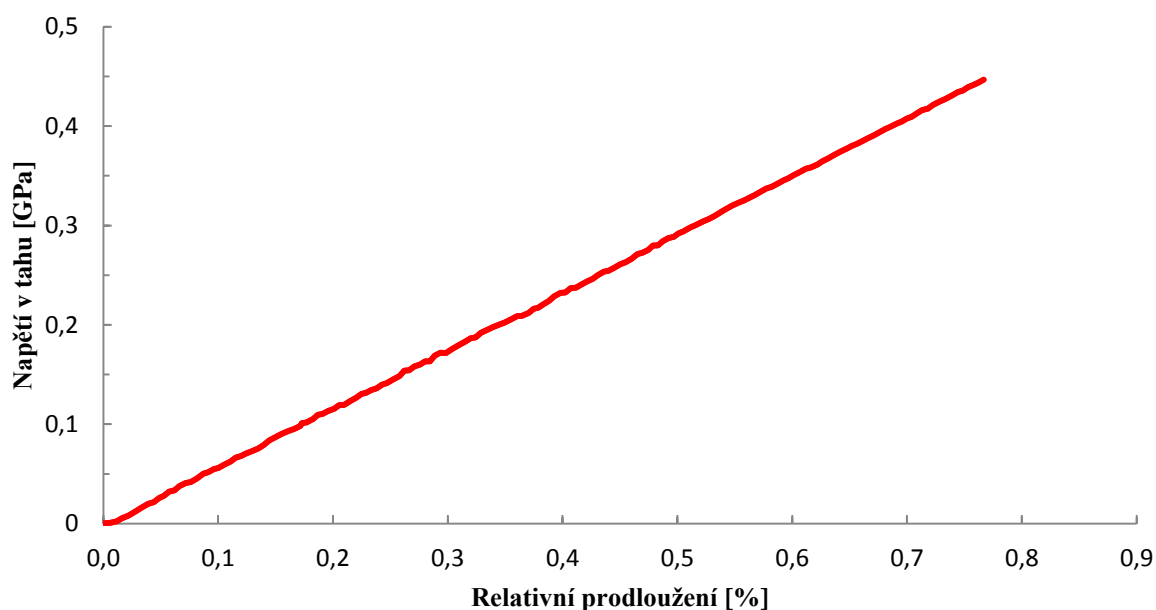
3.2 Tahová zkouška

Konce připravených vzorků po změření průměrů byli uchycené pomocí držáků univerzálního testovacího zařízení ZWICK Z010/TH2A a byla provedena tahová zkouška do poruchy vlákna za konstantní rychlosti 1mm/min při laboratorní teplotě. Výsledkem zatížení vlákna je křivka deformačního napětí **Obr. 14** a **Obr. 15** pro povrchové upravená a neupravená vlákna.



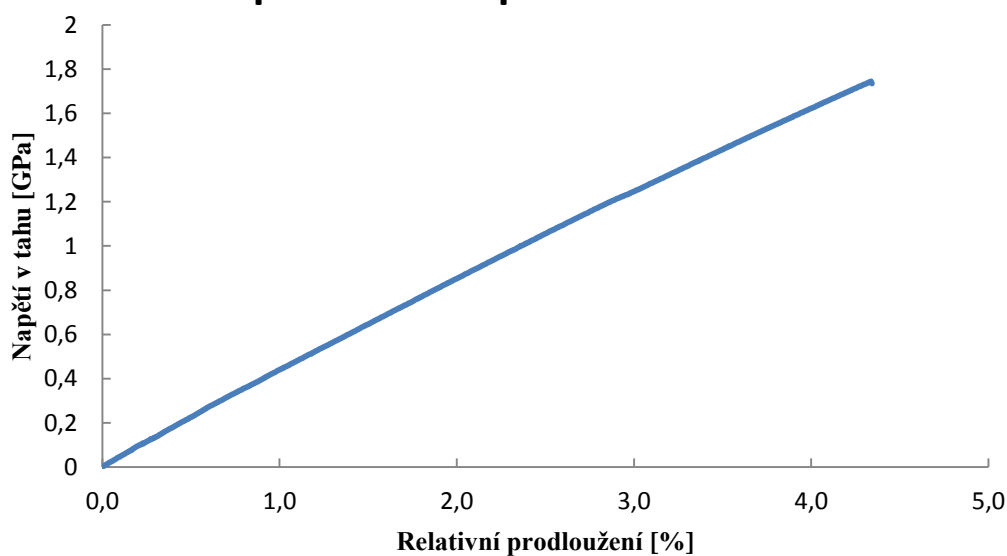
Obr. 13: Testovací zařízení ZWICK Z010/TH2A

Závislost napětí v tahu na tahovém napětí pro povrchově neupravené vlákno



Obr. 14: Typická tahová křivka pro skleněná neupravená vlákna.

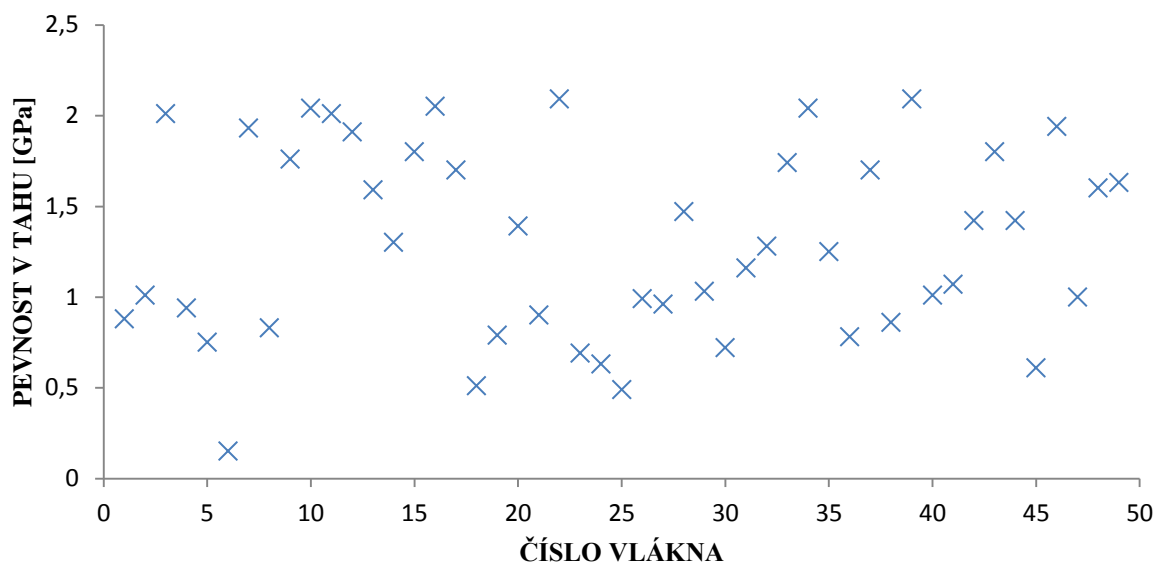
Závislost napětí v tahu na tahovém napětí pro povrchově upravené vlákno



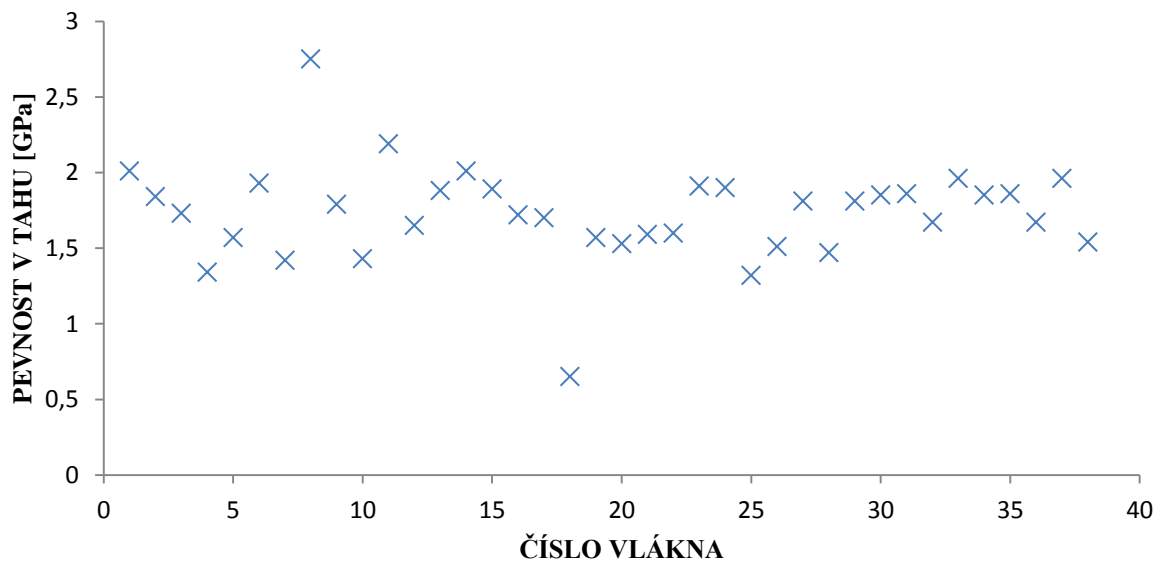
Obr. 15: Typická tahová křivka pro skleněná upravená vlákna.

4. VÝSLEDKY A DISKUZE

První získaná data po tahové zkoušce jsou počáteční data. Data pro povrchově neupravená skleněná vlákna a vlákna s povrchovou úpravou. Musí být řečeno, že vlákno je velmi křehký materiál (v práci s nimi je potřeba opatrnost, existuje možnost zasažení velmi malých částí do oka) a z **Obr. 16** a **Obr. 17** je vidět, že data o tahu jednotlivých vláken představují velký rozptyl v důsledku vad v nich přítomných. Vzhledem k tomu, že přítomnost vad ve vláknech je náhodná, pevnost v tahu musí být statisticky analyzována. Za předpokladu, že pevnost vlákna je ovlivněna nejdůležitější vadou, dva parametry funkce Weibullovo kumulativního rozdělení byli použiti k ohodnocení pevnosti v tahu.



Obr. 16: Rozptyl dat pevnosti v tahu u povrchově neupravených vláken



Obr. 17: Rozptyl dat pevnosti v tahu u povrchově upravených vláken

K výpočtu pravděpodobnosti poruchy byli použiti dva typy odhadu:

1. $P = \left(\frac{i}{N+1} \right)$, za účelem předvídání hodnoty pevnosti z inženýrského hlediska
2. $P = \left(\frac{(i-0.5)}{N} \right)$, za účelem vyhodnocení pevnosti z hlediska vědy o materiálech [6].

Parametry měřítka a tvaru, které velmi přesně popisují experimentálně získaná data, byly ohodnoceny na základě následující rovnice [6]:

$$P = 1 - \exp \left[- \frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{A} \right)^m \right], \quad (10)$$

Univerzální testovací zařízení ZWICK Z010/TH2A zobrazuje sílu v newtonech a posun hlavy v milimetrech. Všechna údaje byly přepočteny ve speciálním programu testXPERT. Aritmetický průměr \bar{x} , směrodatná odchylka s , variační koeficient v , pevnost v tahu R , tažnost F , modul pružnosti v tahu E a průměry vláken jsou uvedeny v **Tab. 3** a **Tab. 4** pro povrchově neupravená a upravená vlákna.

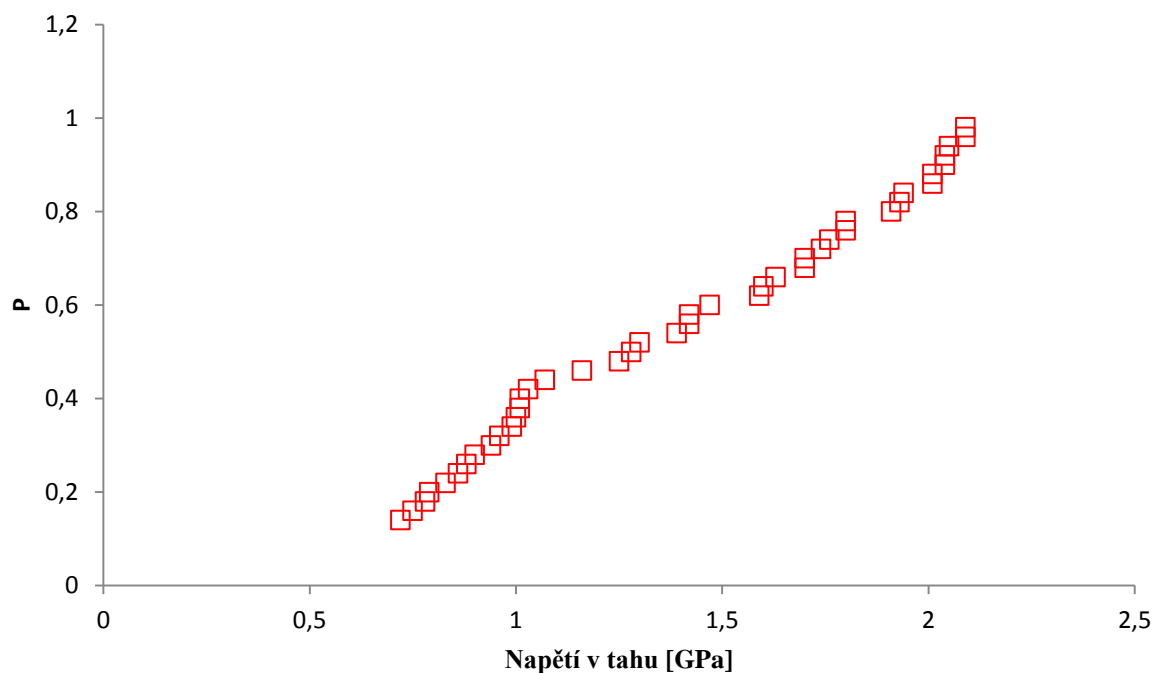
Tab. 3: Vypočtené hodnoty pro povrchově neupravená vlákna.

	Průměr [mm]	E-modul [GPa]	R [GPa]	F [%]
x	0,019	62,35	1,30	2,27
s	0,002	6,85	0,53	0,98
v	0,083	0,11	0,40	0,43

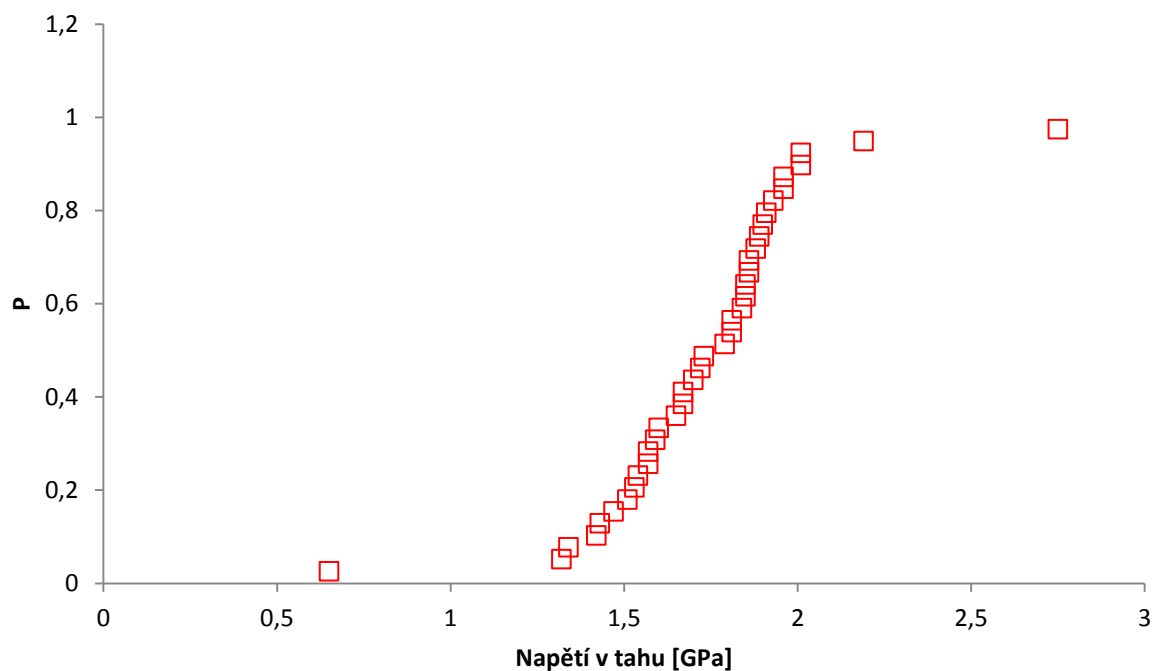
Tab. 4: Vypočtené hodnoty pro povrchově upravená vlákna.

	Průměr [mm]	E-modul [GPa]	R [GPa]	F [%]
x	0,022	55,54	1,73	3,58
s	0,002	4,63	0,32	0,58
v	0,072	0,08	0,18	0,16

Z těchto počátečních hodnot vyplývá, že pevnost v tahu u povrchově upravených vláken je o 25 % větší než u povrchově neupravených vláken. Nelineární, sigmoidální křivka pravděpodobnosti poruchy oproti pevnosti v tahu pro upravená a neupravená vlákna je znázorněná jednotlivě po pořadí na **Obr. 18** a **Obr. 19**. Program Excel neumí vyhodnotit Weibullovu distribuci a proto, aby byly stanoveny hodnoty mediánu namáhání, při které dojde k poruše poloviny vláken, spolu s parametrem měřítka a tvaru, byl použit druhý typ odhadu, který je nejpoužívanějším typem, viz rovnice 11.

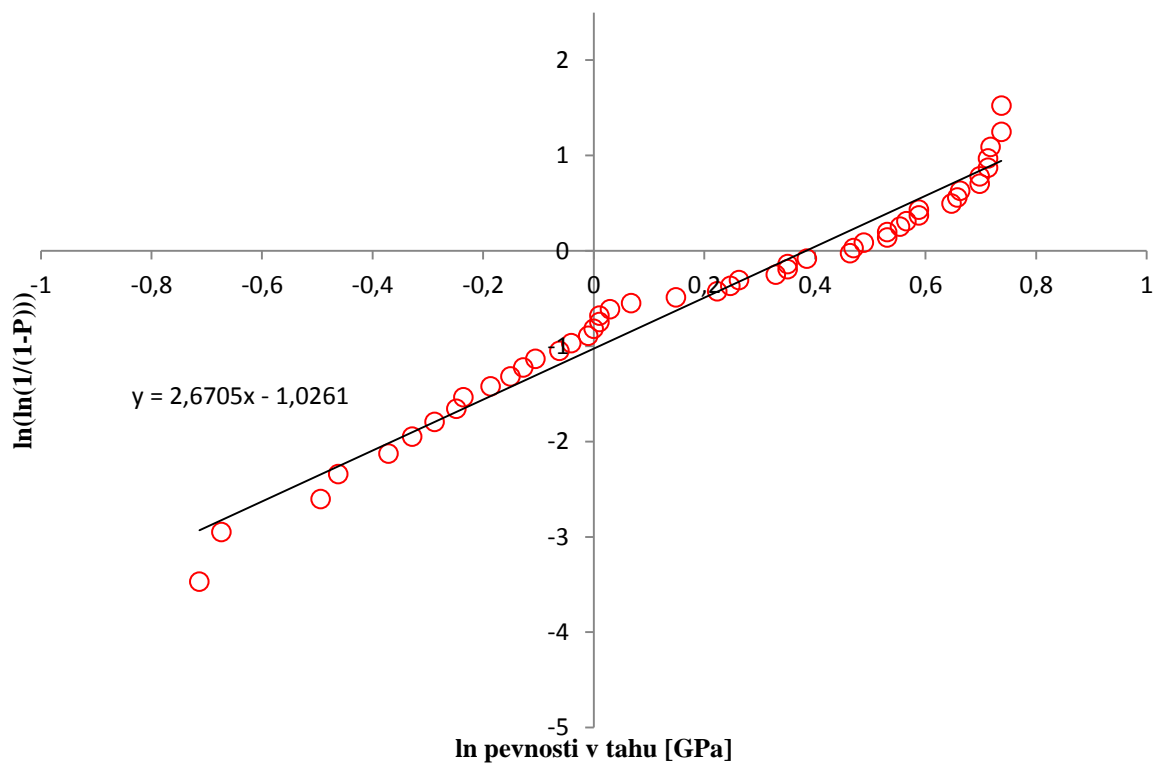


Obr. 18: Pravděpodobnost porušení povrchově neupravených vláken s využitím odhadu z inženýrského hlediska.

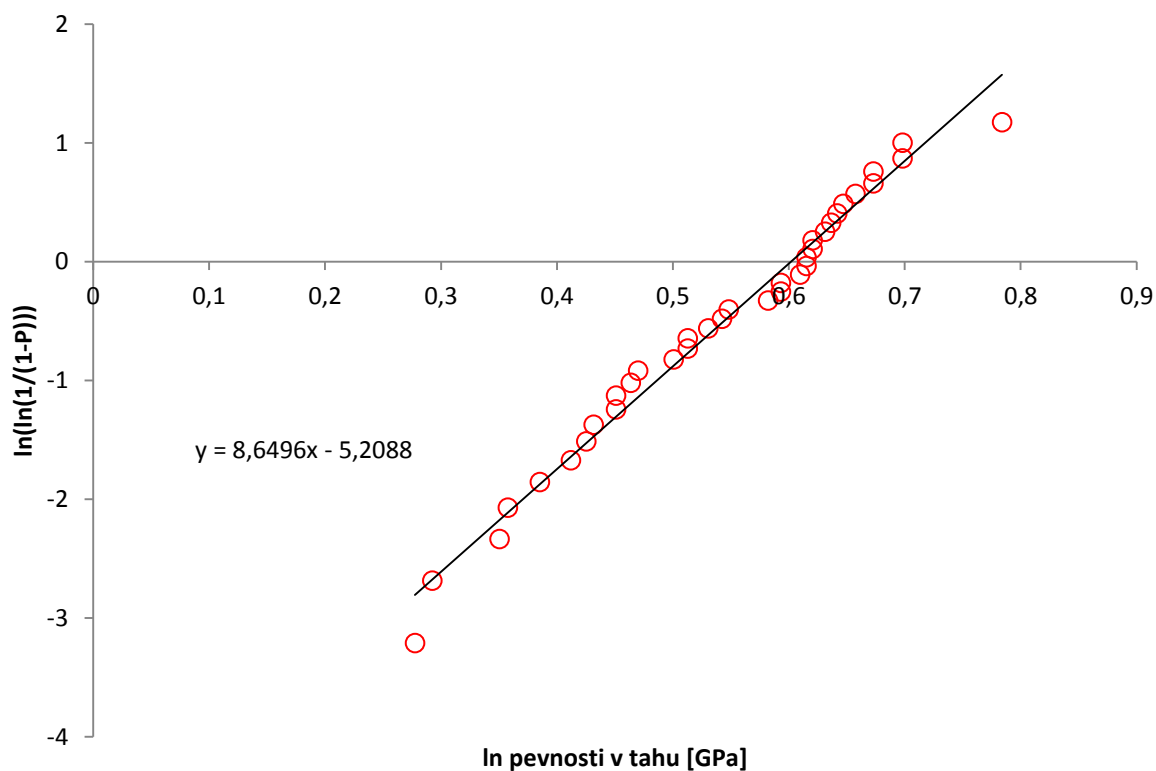


Obr. 19: Pravděpodobnost porušení povrchově upravených vláken s využitím odhadu z inženýrského hlediska.

Druhý typ odhadu byl použit dále pro posouzení hodnot pevnosti stejně jako ohodnocení Weibullových parametrů metodou nejmenších čtverců. Typický graf dvojitého logaritmu je zobrazen na Obr. 20 a Obr. 21.



Obr. 20: Dvouparmetrové Weibullovo rozdělení: závislost $\ln(\ln(1/(1-P)))$ na \ln pevnosti v tahu pro povrchově neupravená vlákna.



Obr. 21: Dvouparmetrové Weibullovo rozdělení: závislost $\ln(\ln(1/(1-P)))$ na \ln pevnosti v tahu pro povrchově upravená vlákna

Hodnoty parametrů měřítka m a tvaru A , obdržené z grafu závislosti $\ln(\ln(1/(1-P)))$ na \ln pevnosti v tahu jsou uvedené v **Tab. 5** a v **Tab. 6** spolu s hodnotou střední pevnosti v tahu rozptylu, spočítanou podle následující rovnice:

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-P} \right) = m \ln \sigma + m \ln \frac{L^{1/m}}{A}, \quad (11)$$

Tab. 5: Střední pevnost v tahu spolu s parametry měřítka a tvaru pro povrchově neupravená vlákna.

Hodnota	
m	2,67±0,07
A	-1,03±0,03
Pevnost v tahu [GPa]	1,28

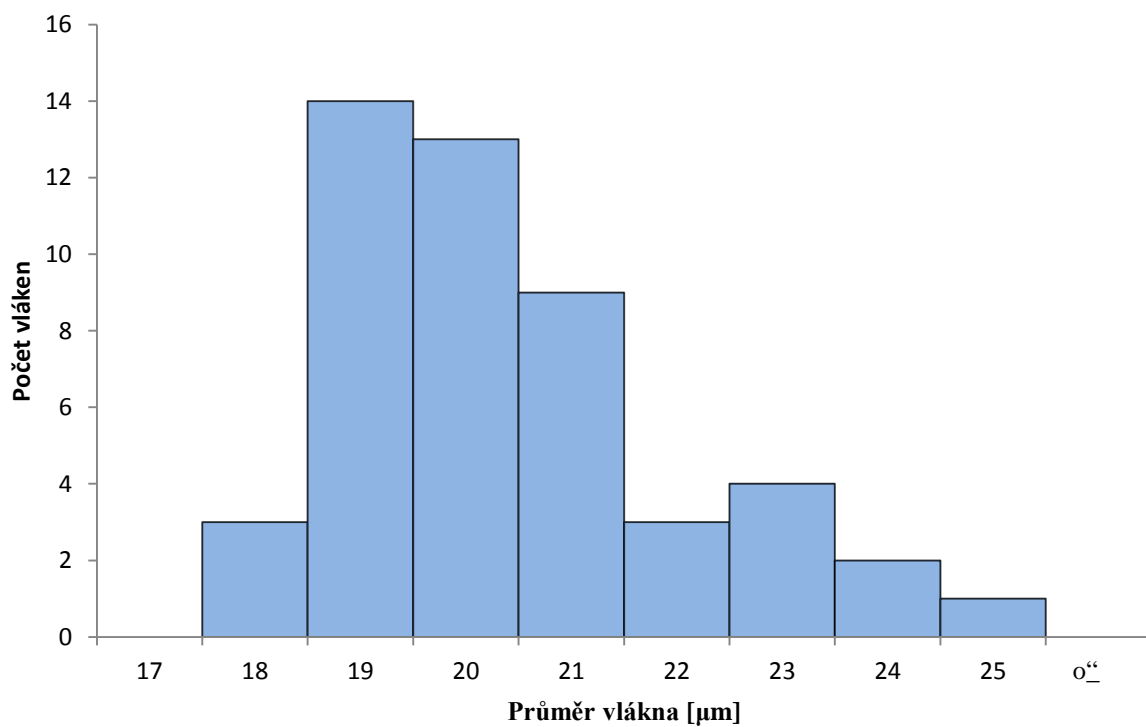
Tab. 6: Střední pevnost v tahu spolu s parametry měřítka a tvaru pro povrchově upravená vlákna.

Hodnota	
m	8,65±0,20
A	-5,21±0,11
Pevnost v tahu [GPa]	1,75

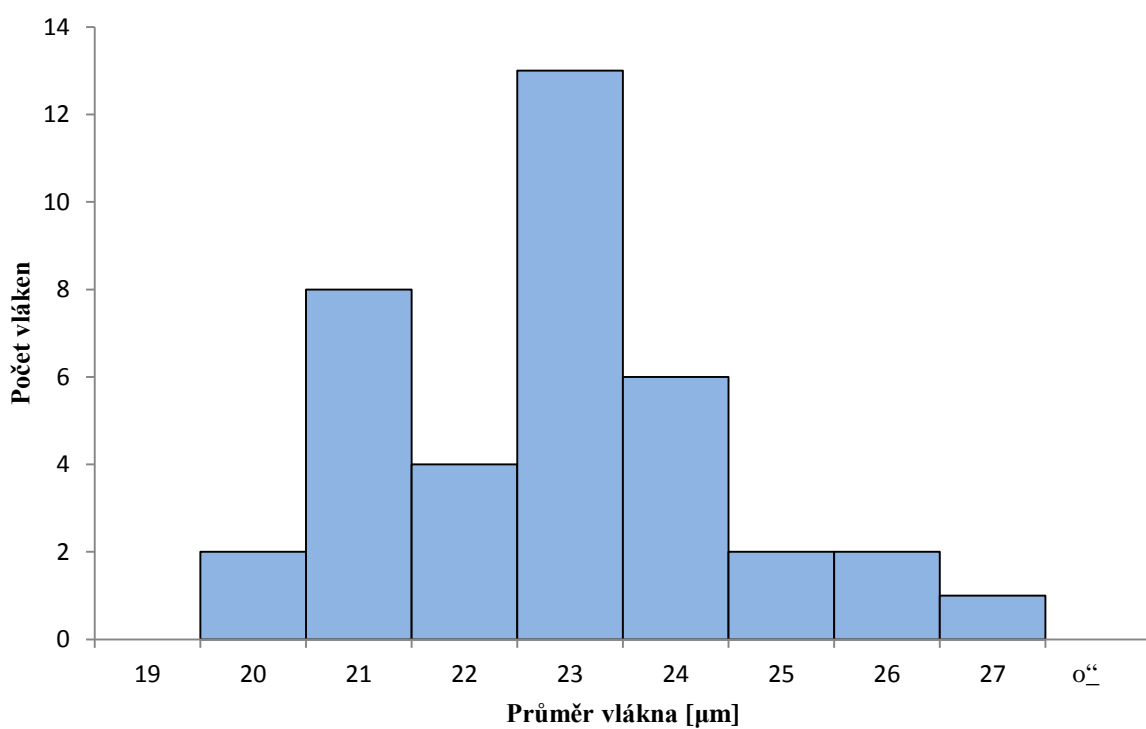
Z grafu závislosti $\ln(\ln(1/(1-P)))$ na \ln pevnosti v tahu byla získána rovnice lineární regrese $y = 2,670x - 1,026$. Po dosazení hodnoty pravděpodobnosti 0,5, byla získána hodnota střední pevnosti v tahu 1,28 GPa. Pomocí funkce v EXCELU LINREGRESE byly spočítány standardní chyby parametrů měřítka a tvaru.

Hodnoty pevnosti v tahu získané tahovou zkouškou a statisticky vyhodnocené prostřednictvím Weibullových distribuce vyjevili, že pevnost povrchově neupravených vláken je o 25% menší pevnosti povrchově upravených vláken. Statistická analýza dvouparametrovým Weibullovým rozdělením se nejlépe hodí pro obdržená experimentální data a je standardní metodou pro statistické zpracování hodnot křehkých materiálů včetně skleněných a uhlíkových vláken. Dvouparametrové Weibullovo rozdělení s použitím odhadu z hlediska vědy o materiálech pravděpodobnosti poruchy a metoda nejmenších čtverců byly použity k ohodnocení všech naměřených dat.

Je dobře známo, že pevnost v tahu skleněných vláken klesá se zvětšením jejich délky z toho důvodu, že zvětšuje se pravděpodobnost výskytu většího počtu vad. V této oblasti bylo prováděno hodně výzkumu [11]. Obdobný efekt má větší průměr, protože má větší objem stejně jako povrchových vad. Rozptyl průměrů neupravených a upravených skleněných vláken je znázorněn na **Obr. 22** a na **Obr. 23**. Průměry vláken se různí, to je důvodem proč se liší jejich pevnosti v tahu. Z histogramu pro neupravená vlákna je vidět, že nejběžnější hodnota průměru je 19 μm, stejná jak zaručuje výrobce Saint-Gobain Adfors CZ, Česká Republika. Z histogramu pro upravená je však vidět, že nejčastěji se vyskytují vlákna s hodnotou, která blíží k 23 μm.



Obr. 22: Histogram povrchově neupravených vláken.



Obr. 23: Histogram povrchově upravených vláken.

5. ZÁVĚR

V teoretické části byla provedena literární rešerše z vláken vyztužených polymerních kompozitů, skleněných vláken jako formy výztuže a tahového testu. Byly popsány složení a vlastnosti skleněných vláken v závislosti na jejich použití, výroba a jejich povrchová úprava, vliv úpravy na další vlastnosti včetně nutných pro polymerní kompozity. Byl popsán postup měření a převedeny výpočty pro následující experimentální část.

V experimentální části je popsána příprava vzorků pro tahový test jednotlivých skleněných vláken, použité materiály pro přípravu vzorku, popis zařízení a průběh měření. Uvedeny grafy typických tahových křivek pro skleněná vlákna, která zobrazují závislost pevnosti v tahu na tahovém napětí, ze kterých je vidět, že pevnost v tahu povrchově neupravených vláken je nižší, než vláken upravených.

Povrchově upravená (707) a povrchově neupravená skleněná vlákna byla testována v tahu za účelem zjištění mechanických vlastností. Bylo zjištěno, že upravená skleněná vlákna mají pevnost v tahu vyšší o 25%, než vlákna neupravená s hodnotou pevnosti 1,30 GPa. Povrchově neupravená vlákna vykázali větší modul pružnosti, což znamená, že mají menší deformaci, kdy při stejném napětí v tahu prokazují upravená skleněná vlákna podstatně větší deformace, než neupravená. To nemůže být způsobeno vlivem povrchové úpravy vláken. Cílem výrobce je zvětšení pevnosti vláken. Je nutné říct, že povrchová úprava vláken je nezbytným předpokladem pro dosažení dostatečných jejich mechanických vlastností pro účely vyztužení polymerních kompozitů.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Bunsell A. R., Schwartz P.: Fiber Test Methods. *Comperhensive Composite Materials*, **5.04**, 1-22, 2000.
- [2] Dwight W. David: Glass Fiber Reinforcement. *Comperhensive Composite Materials*, **1.08**, 1-22, 2000.
- [3] HULL, Derek a F.W. CLYNE. An Introduction To Composite Materials. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-38855-4.
- [4] PUCKETT, Garry D. *Sizing composition for glass fibers and sized fiber glass products*. 2007. US7291390 B2. Uděleno 7. listopad 2003. Zapsáno 6. listopad 2007.
- [5] FEIH, Stefanie, A. THRANER a H. LILHOLT. Tensile strength and fracture surface characterization of sized and unsized glass fibers. *Journal Of Materials Science*. 2005, 2005(40), 1615-1623.
- [6] Fok L. S., Mitchell C. B., Smart J., Marsden J. B.: A numerice study of the application of the Weibull theory to Brittle materials, *Engineering Fracture Mechanics*, **68**, 1171-1179, 2001.
- [7] Phani K. K.: Strength distribution and gauge length extrapolations in glass fibre, *Journal Of Material Science*, **23**, 1189-1194, 1988.
- [8] Bergman Bill: On the estimation of the Weibull modulus, *Journal Of Material Science*, **3**, 689-692, 1984.
- [9] Gurvich R. M., DiBenedetto T. A., Ranode V. S.: A new statistical distribution for characterising the random strength of brittle materials, *Journal Of Material Science*, **32**, 2559-2564, 1997.
- [10] Gurvich R. M., DiBenedetto T. A.: Evaluation of the statistical parameters of a Weibull distribution, *Journal of Material Science*, **32**, 3711-3716, 1997.
- [11] Jones F. R.: High-performance fibres. *Woodhead Publishing Ltd.*, 2001.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

LOI	ztráta při žihání
SEM	rastrovací elektronový mikroskop
FTIR	infračervená spektroskopie
σ_{TS}	napětí v tahu
n, N	počet provedených měření
F	tažnost
d	průměr vlákna
ν, μ_{TS}	variační koeficient pevnosti v tahu
μ_F	koeficient zatížení
μ_d	koeficient diametrů
s	směrodatná odchylka
s_{TS}	výsledná směrodatná odchylka
\bar{x}	aritmetický průměr
P	pravděpodobnost přežití (neporušení)
m	parametr měřítka Weibullova rozdělení
A	parametr tvaru Weibullova rozdělení